

Ricerca di Sistema elettrico



Modellazione di scenari di shift modale a favore di modalità alternative alle auto private (LA3.26)

Ing. Rosita De Vincentis

Prof. Ing. Marialisa Nigro; Prof. Ing. Marco Petrelli

Modellazione di scenari di shift modale a favore di modalità alternative alle auto private

Ing. R. de Vincentis, Prof. Ing. M. Nigro, Prof. Ing. M. Petrelli (Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica e delle Tecnologie Aeronautiche, Università Roma Tre)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 - Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: LA3.26

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Fernando, Ortenzi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Marialisa Nigro, Università degli Studi Roma Tre

Mese inizio previsto: 01/01/2023

Mese inizio effettivo: 01/01/2023

Mese fine previsto: 31/12/2024

Mese fine effettivo: 31/12/2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Tecnologie sperimentali per la ricarica dei veicoli elettrici e modelli per l'analisi e la simulazione della mobilità urbana

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
2.1	Raccolta dati	6
2.2	Ricostruzione dei profili di spostamento sui servizi di trasporto collettivo	6
2.3	Definizione e computo di indicatori di accessibilità e di prestazioni offerte dai servizi di trasporto collettivo	7
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Raccolta dati e creazione di un database geografico	11
7.1.1	Dati relativi alla rete stradale, all'uso del territorio ed alle attività presenti.....	11
7.1.2	Dati di domanda e di utilizzo dei servizi di trasporto collettivo	14
7.1.3	Dati sull'offerta dei servizi di trasporto collettivo	14
7.2	Ricostruzione dei profili di spostamento sulla mobilità collettiva a partire da dati monitorati.....	15
7.3	Metodologia per l'identificazione di "Special Attractors".....	17
7.4	Valutazione dello <i>script</i> di <i>routing</i> Connection Scan Algorithm.....	20
7.5	Definizione di un sistema di indicatori a supporto della valutazione del sistema di trasporto pubblico	21
8	Eventi di disseminazione e pubblicazioni scientifiche	25
9	Riferimenti bibliografici	26

Indice delle figure

Figura 1. Zonizzazione della provincia di Roma.....	11
Figura 2. Poli ospedalieri (a) e poli universitari (b).....	12
Figura 3. Scuole superiori di secondo grado nella Città Metropolitana di Roma Capitale.	12
Figura 4. Principali siti turistici Comune di Roma.....	13
Figura 5. Carta Nazionale di Copertura del Suolo ISPRA 2022.....	13
Figura 6. Andamento orario delle somme delle validazioni nei giorni feriali	15
Figura 7. Andamento orario delle somme delle validazioni nei giorni feriali nelle stazioni di Pietralata (a) e Spagna (b).....	16
Figura 8. Profilo risultante matrici orarie per giorno feriale medio.....	16
Figura 9. Confronto tra Generazioni e Attrazioni complessive delle singole zone nella giornata prima (sinistra) e dopo (destra) il bilanciamento.....	17
Figura 10. Esempio accorpamento di zone Special Attractors completamente incluse nel buffer.	17
Figura 11. Insieme finale delle zone Special Attractors e loro localizzazione rispetto all'ambito PGTU	18
Figura 12. Validazione zone Special Attractors in base a numerosità di zone.....	19
Figura 13. Validazione zone Special Attractors in base a domanda attratta.	19
Figura 14. Posizionamento del centroide di zona baricentrico e suo spostamento in funzione del land-use e delle fermate del trasporto pubblico.....	21

Indice delle tabelle

Tabella 1. Statistiche di tempi e distanze derivanti da CSA sul caso studio romano, orario di partenza 7:00 am, giorno feriale medio.....	20
Tabella 2. Indicatori di pedonalità.....	22
Tabella 3. Indicatori sul Servizio offerto.....	22
Tabella 4. Indicatori di Prestazione del Servizio	23
Tabella 5. Indicatori di Connettività	23
Tabella 6. Indicatori di Efficienza Energetica	24

1 Risultati attesi

L'obiettivo della LA 3.26 è di sviluppare un'architettura modellistica in grado di utilizzare in modo innovativo i flussi informativi relativi alla mobilità delle persone ed al contesto territoriale di studio, con il fine di valutare le prestazioni del sistema di trasporto collettivo e fornire supporto al decisore in merito a strategie ed interventi nell'ottica di una pianificazione sostenibile, a ridotto dispendio energetico e dunque alternativa all'utilizzo dell'auto privata. L'impianto modellistico è pensato per:

1. ricostruire i profili di spostamento degli utenti dei servizi di trasporto collettivo in ambito urbano a partire da differenti livelli di disponibilità dei dati monitorati;
2. computare indicatori di accessibilità dei servizi di trasporto collettivo che possano essere relazionati a zone dell'area di studio o coppie di zone (origine-destinazione);
3. effettuare una valutazione quantitativa delle prestazioni offerte dai servizi del trasporto collettivo anche dal punto di vista energetico;
4. derivare informazioni necessarie ad alimentare modelli di ripartizione modale per la valutazione di politiche e interventi a favore della mobilità del trasporto collettivo in un'ottica di sostenibilità energetica.

Poiché alla base della LA vi è la necessità di una messa a sistema di dati che possano concorrere allo sviluppo delle singole fasi del progetto, uno dei principali risultati attesi è quello di effettuare una raccolta dati il più dettagliata possibile in merito a offerta dei servizi di trasporto collettivo e relativa rete di accesso, domanda e utilizzo dei servizi di trasporto collettivo, dati socio-economici e informazioni su uso del territorio. In particolare tali dati saranno raccolti rispetto al caso studio su cui si svilupperà l'impianto modellistico, ovvero il Comune di Roma per un totale di più di 2.7 milioni di residenti distribuiti su un'area di 1'287 km². Si auspica che i dati raccolti possano essere il più possibile *open data*.

Per la successiva fase di ricostruzione dei profili di spostamento sui servizi di trasporto collettivo, il risultato atteso è legato allo sviluppo di un modulo che permetta di simulare l'uso da parte degli utenti dei servizi di trasporto collettivo "tracciati" attraverso i sistemi di rilevamento disposti sulla rete del trasporto collettivo (passaggi ai tornelli, rilevatori Bluetooth, sistemi di lettura SmartCard). Ciò permette di derivare l'informazione relativi ai carichi sui differenti servizi di trasporto collettivo a partire dalla conoscenza del dato di domanda; l'informazione sui carichi garantisce di valutare l'effettivo utilizzo del servizio almeno nel suo stato attuale/rilevato.

La fase più consistente della LA è la fase di definizione e computo di indicatori di accessibilità e di prestazioni offerte dai servizi di trasporto collettivo, inclusi indicatori legati alla sostenibilità energetica. Tali indicatori, la cui definizione è oggetto del presente studio, permettono al pianificatore di effettuare una valutazione circa lo stato attuale del servizio e delle cause che determinano il relativo stato, nonché ipotizzare delle azioni e misure da adottare per migliorare lo stato rilevato a vantaggio di un incremento della ripartizione modale a favore del trasporto collettivo. Gli indicatori saranno computati a livello zonale, anche tenendo conto delle specificità delle relazioni origine-destinazione coperte dalla zona oggetto di analisi. Poiché differenti indicatori necessitano di essere alimentati da informazioni quali tempi di viaggio (e relative componenti temporali: accesso, attesa e trasbordo) e distanze percorse tramite i servizi di trasporto collettivo, in tale studio si adotterà lo script fornito da ENEA per il calcolo degli itinerari di viaggio degli utenti (routing su trasporto collettivo) e basato su algoritmi di tipo Connection Scan Algorithm. Tale script sarà oggetto di una accurata fase di analisi, calibrazione e validazione.

Si sottolinea come, nonostante l'applicazione dell'impianto modellistico veda la trattazione di un caso studio specifico, questo sia agevolmente trasferibile a contesti urbani differenti.

2 Risultati ottenuti

Seguendo i risultati attesi dalla LA 3.26, di seguito si riporta quanto ottenuto.

2.1 Raccolta dati

La fase di raccolta dati parte dalla definizione della zonizzazione che verrà utilizzata per il caso di studio. Questa è in particolare la zonizzazione della Città Metropolitana di Roma Capitale fornita da Roma Servizi per la Mobilità (RSM) e composta da 1331 zone di cui 1186 intra Comune di Roma.

Rispetto a tale zonizzazione sono stati collezionati:

- **Dati relativi alla rete stradale, all'uso del territorio ed alle attività presenti.** Tali dati provengono da diverse fonti. Alcuni infatti sono stati forniti da Roma Servizi per la Mobilità (dati socioeconomici), altri sono *open*, estrapolati da banche dati di differente natura (punti di interesse o Pols, dati ISPRA ed ESA, dati Open Street Map). In merito al trattamento del dato, alcuni dati saranno utilizzati *as is*, altri necessiteranno di successive elaborazioni, altri ancora di integrazione tra fonti differenti;
- **Dati di domanda e di utilizzo dei servizi di trasporto collettivo:** I principali dati di domanda e di utilizzo del sistema di trasporto pubblico sono stati forniti da Roma Servizi per la Mobilità. Essi consistono in una matrice di domanda del trasporto pubblico nell'ora di punta della mattina di un giorno feriale medio ed i dati dei passeggeri in ingresso [pax/h] rilevati ai tornelli durante i periodi di ottobre-novembre 2022 e febbraio-marzo 2023 presso le stazioni delle linee metropolitane romane e la ferrovia Ostia Lido;
- **Dati sull'offerta dei servizi di trasporto collettivo:** Per il computo dei tempi di viaggio e relative componenti (tempo a piedi, attesa, tempo a bordo), della soluzione di viaggio scelta (*routing*) tra singola coppia origine-destinazione, nonché per altre informazioni quali numero di trasbordi, fermate, numero di linee per fermata, frequenza di linea, si utilizzano i *General Transit Feed Specification* (GTFS; Google Transit, 2024). I dati GTFS sono un formato geo-referenziato e standardizzato per la pubblicazione on line dei servizi da parte delle agenzie di trasporto pubblico locale. Questo formato può essere statico, quando fornisce informazioni sui servizi programmati, oppure dinamico, nel caso includa dati in tempo reale come ritardi e variazioni di servizio. Nel presente studio i dati GTFS utilizzati sono di tipo statico.

2.2 Ricostruzione dei profili di spostamento sui servizi di trasporto collettivo

Il risultato ottenuto è in questo caso la ricostruzione delle **matrici di domanda orarie del trasporto collettivo allo stato attuale all'interno della fascia temporale di funzionamento dello stesso in un giorno feriale medio**. Le matrici ricostruite assicurano il bilanciamento tra partenze e rientri nell'arco della giornata non solo a livello aggregato ma anche a livello zonale. A partire da tali matrici è possibile arrivare a simulare l'uso dei servizi di trasporto collettivo da parte degli utenti; si sottolinea che il possibile passaggio dalle matrici ai carichi necessita di dati per essere impostato e validato: tali dati non sono disponibili, in quanto ad oggi per l'area romana gli unici dati a disposizione dello studio sono la matrice di domanda del trasporto pubblico per l'ora di punta della mattina di un giorno feriale medio e i dati dei passeggeri in ingresso [pax/h] rilevati ai tornelli durante i periodi di ottobre-novembre 2022 e febbraio-marzo 2023 della rete metropolitana romana e della ferrovia Ostia Lido. Mancano dati di validazione Smart-Card che permetterebbero il tracciamento della catena di spostamento del

generico utente. Con la ricostruzione dei profili in termini di matrici di domanda si è quindi ad un livello di dettaglio più aggregato in quanto le matrici indicano la quantità di utenti che desidera spostarsi tramite trasporto collettivo ma non vengono "tracciati" lungo il loro itinerario.

2.3 Definizione e computo di indicatori di accessibilità e di prestazioni offerte dai servizi di trasporto collettivo

Sono stati definiti e computati a livello zonale 19 indicatori, così classificati:

1. Indicatori di **Pedonalità**: 4 indicatori che permettono di valutare la propensione alla pedonalità di un'area. Sono principalmente legati a informazioni che derivano dalla struttura (nodi e archi) della rete percorribile da un utente che si sposta a piedi;
2. Indicatori sul **Servizio offerto**: 5 indicatori che permettono di valutare la presenza del servizio e la "quantità" di servizio offerto;
3. Indicatori di **Prestazione del servizio**: 6 indicatori che misurano le caratteristiche principali in termini di distanze e tempi nel momento in cui si effettua uno spostamento origine-destinazione con il trasporto collettivo;
4. Indicatori di **Connettività**: 1 indicatore che misura quante e quali zone sono raggiungibili data una origine secondo determinate classi di tempi di viaggio;
5. Indicatori di **Efficienza energetica**: 3 indicatori che misurano la maggiore o minore efficienza energetica garantita dal servizio di trasporto collettivo sia in termini di distanze che in termini emissivi.

Per arrivare al computo dei suddetti indicatori si è passati per due fasi essenziali dello studio, che sono parte integrante del framework metodologico: la definizione dei cosiddetti "**Special Attractors**" e l'**analisi, calibrazione e validazione dello script di routing** fornito da ENEA.

Gli *Special Attractors* sono qui definiti come aree in cui si concentrano attività che richiamano una forte quantità di spostamenti sistematici; la loro individuazione permette di concentrare l'analisi sull'efficacia del servizio di trasporto collettivo verso destinazioni di effettivo interesse per il servizio stesso in quanto individuano relazioni ad elevato potenziale di domanda. Poiché la gran parte degli spostamenti (da matrice del trasporto pubblico RSM) si verificano intra Comune di Roma o sono spostamenti di penetrazione dai comuni dell'area metropolitana a Roma stessa, gli *Special Attractors* fanno principalmente riferimento a zone intra comune di Roma, ad eccezione di alcuni casi specifici quali l'Aeroporto di Fiumicino. Si sottolinea inoltre come la zonizzazione esterna al Comune di Roma limita l'analisi delle variazioni spaziali all'interno dei singoli comuni, rendendo difficile cogliere dettagli quali la distribuzione degli addetti o di punti di interesse al loro interno. Infine, esternamente al Comune di Roma, la tipologia di servizio di trasporto collettivo assume connotazioni differenti da quanto accade in ambito urbano e, conseguentemente, non può essere trattata con lo stesso livello di analisi adottato per il caso urbano. Nel presente studio viene definita una metodologia per l'individuazione degli *Special Attractors* a partire dai dati su uso del suolo e attività collezionate all'interno del database geografico.

L'analisi, la calibrazione e la validazione dello script di routing fornito da ENEA e basato sul Connection Scan Algorithm è risultato fondamentale per garantire l'affidabilità degli output forniti dallo script stesso con specifico riferimento al caso di studio.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi dalla LA 3.26, come da capitolato, sono:

- Un rapporto tecnico descrittivo delle attività implementate e della modellistica sviluppata;
- Database relativo a dati di input e output;
- Script dei modelli di ricostruzione dei profili di spostamento;
- Script per il calcolo degli indicatori.

4 Prodotti sviluppati

Il presente **rapporto tecnico** rappresenta il primo prodotto sviluppato: esso riassume le principali fasi del progetto ed il loro sviluppo, nonché riassume i principali risultati ottenuti.

Oltre a tale rapporto, verranno forniti:

- **Database della zonizzazione di studio** con correlati **dati di input** e **database dei punti di interesse**, con **relativo file di supporto per la lettura** dei campi;
- **Database degli indicatori** di accessibilità e di prestazioni offerte dai servizi di trasporto collettivo e **relativo file di supporto per la lettura** dei campi. Nello stesso database è previsto l'inserimento di un campo per l'identificazione degli **Special Attractors**;
- File CSV contenente le zone ricadenti nell' Ideal Area di uno *Special Attractor* (qualora lo *Special Attractor* sia caratterizzato dalla presenza di una stazione ferroviaria e/o metropolitana, come dettagliato nel paragrafo 7.3 del presente rapporto tecnico);
- File **CSV** contenente i **profili di spostamento** in termini di matrici orarie e relativo file di sunto metodologico;
- Script per il calcolo degli indicatori: molti indicatori, come verranno definiti nel dettaglio del report, derivano da *query* sui dati di input condotte in QGIS; per gli indicatori di più complesso computo, verranno forniti i relativi script Python.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si riscontrano effettivi scostamenti tra attività attese e sviluppate, quanto si vogliono in tale sezione evidenziare alcune criticità incontrate nello sviluppo del progetto.

La prima criticità riguarda tutta la fase di raccolta dati: in particolare si segnala come molti dati, ipotizzati inizialmente come *open* e di facile predisposizione, archiviazione e elaborazione, non siano in effetti tali.

Partendo ad esempio dai dati sul territorio e sulle attività, numerosi sono i dati non più recenti o non aggiornati o di difficile elaborazione in quanto affetti da *bias* o da errori di rilievo o da errore di aggregazione. Le singole criticità sono state riportate in dettaglio nel report e, nella maggioranza dei casi, vedono la necessità di rivolgersi ad altre fonti, che però spesso non risultano geolocalizzate sul territorio e che richiedono quindi una ulteriore fase di elaborazione.

Quando si passa ai dati del trasporto collettivo, la situazione di scarsità del dato risulta ancora più evidente, laddove l'unico dato rilevato risulta essere il dato di entrata ai tornelli della rete metropolitana (o di altre specifiche stazioni ferroviarie); nulla quindi è noto circa il "movimento" dell'utente lungo la rete, al fine di ottenere un dato almeno parzialmente simile al dato da veicoli sonda sulla rete del trasporto privato (Floating Car Data). Ciò chiaramente influisce sulla possibilità di profilare gli spostamenti degli utenti sulla rete del trasporto pubblico e simularne le scelte: l'unica attività percorribile in tale frangente è la derivazione di un profilo di domanda, come condotta nel presente studio.

La relativa mancanza dei carichi sulla rete, che potrebbe derivare dall'assegnazione della domanda sulla rete del trasporto collettivo, è limitante rispetto ad un più puntuale computo degli indicatori di carattere energetico che vedono il loro basarsi, in tale progetto, su ipotesi di carico dei servizi.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte nella II e III annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 sono sintetizzabili in:

1. Raccolta dati e creazione di un database geografico;
2. Ricostruzione dei profili di spostamento sulla mobilità collettiva a partire da dati monitorati;
3. Metodologia per l'identificazione di "special attractors": aree in cui si concentrano attività che richiamano una forte quantità di spostamenti sistematici;
4. Valutazione degli script di *routing* (inteso come sequenza di linee del trasporto collettivo utilizzate per raggiungere una destinazione da un'origine per un prefissato orario di partenza) forniti da ENEA e calibrazione dei relativi parametri;
5. Identificazione e computo di indicatori a supporto della valutazione del sistema di trasporto pubblico.

Nel capitolo successivo si forniranno i dettagli delle singole attività.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Raccolta dati e creazione di un database geografico

La fase di raccolta dati parte dalla definizione della zonizzazione utilizzata, ovvero la zonizzazione della Città Metropolitana di Roma Capitale fornita da Roma Servizi per la Mobilità - RSM (1331 zone di cui 1186 intra Comune di Roma, Figura 1). Si ricorda che le principali fasi relative all'identificazione di "special attractors" e all'identificazione e computo di indicatori si concentrano sulla sola area comunale e relativa zonizzazione; ciò poiché, dovendo costruire un framework modellistico per la valutazione del servizio di trasporto collettivo d'ausilio ad una progettazione sostenibile, le caratteristiche e le esigenze del sistema di trasporto collettivo urbano ben si distinguono dal caso extraurbano.

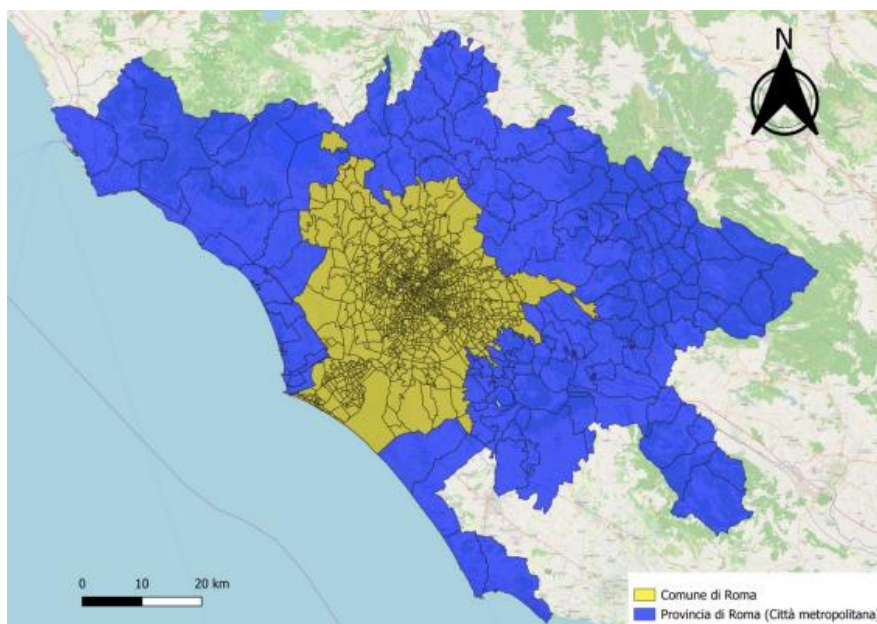


Figura 1. Zonizzazione della provincia di Roma.

7.1.1 Dati relativi alla rete stradale, all'uso del territorio ed alle attività presenti

Tali dati provengono da diverse fonti quali Roma Servizi per la Mobilità (dati socioeconomici), altri sono *open*, estrapolati da banche dati di differente natura (punti di interesse o Pols, dati ISPRA ed ESA - Figura 5, dati Open Street Map). In merito al trattamento del dato, alcuni dati saranno utilizzati *as is*, altri necessiteranno di successive elaborazioni, altri ancora di integrazione tra fonti differenti.

Roma Servizi per la Mobilità ha fornito i dati socioeconomici aggiornati al 2020 relativi alle singole zone. Questi consistono in informazioni su popolazione, occupati, studenti delle scuole superiori e universitari, nonché il numero di addetti anche suddiviso per settore (pubblico, privato, commerciale, scuole e università).

Per i punti di interesse o Pols, si è ricorsi alla libreria OSMnx di Python (Boeing, 2024). Usando questa libreria sono state importate diverse attività da Google Maps, includendo servizi, negozi, uffici, punti di assistenza sanitaria, siti turistici, tempo libero, emergenze e artigianato. Sono stati importati circa 32 mila Pols, differenziati in 132 types e aggregati in 29 macro-type. Per localizzare i grandi ospedali nella Città Metropolitana è stato usato il portale della Regione Lazio, per un totale di 22 poli ospedalieri nel territorio comunale (Figura 2, a).

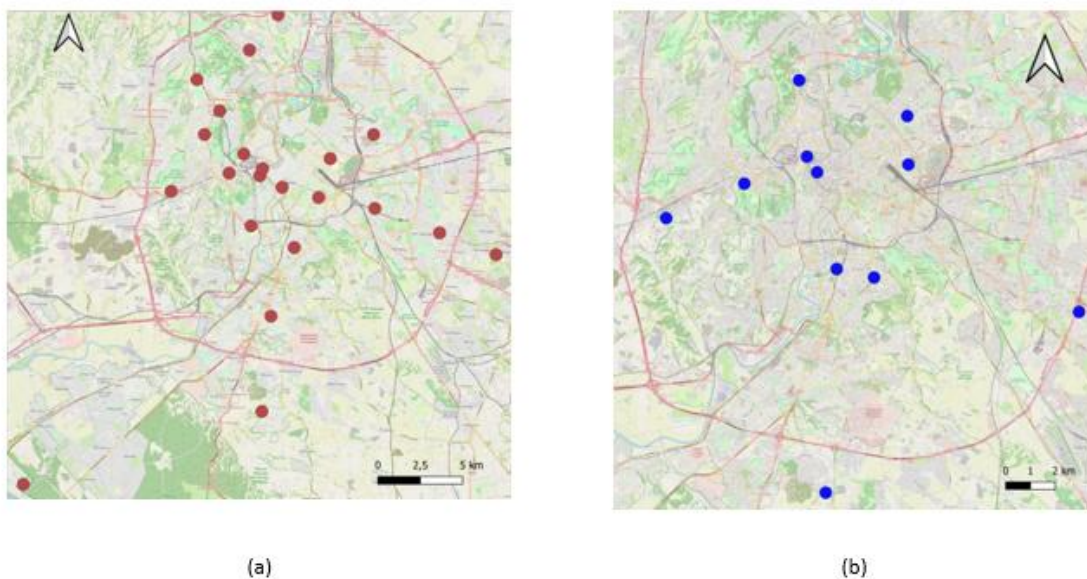


Figura 2. Poli ospedalieri (a) e poli universitari (b).

Per le università è stato importato il database dal Ministero dell'Università e della Ricerca (2024): esso riporta la sede principale di ogni università accreditata dal Ministero stesso, 11 totali di cui afferenti a università telematiche (Figura 2, b).

Oltre alle università, per una differenziazione della tipologia di scuola (primaria, secondaria di primo e secondo grado), è possibile derivare le informazioni circa i singoli istituti attraverso il database della provincia di Roma (dati open Provincia, 2024); ad esempio in Figura 3 si riporta il dettaglio delle scuole secondarie di secondo grado.

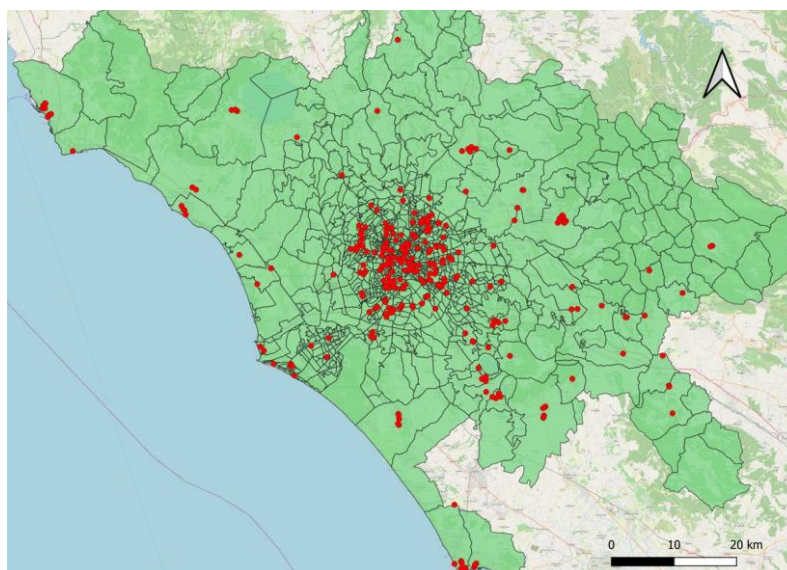


Figura 3. Scuole superiori di secondo grado nella Città Metropolitana di Roma Capitale.

Dal sito del Comune di Roma dedicato al turismo è stato importato il database con gli 8 principali siti turistici riconosciuti a livello mondiale (Figura 4).

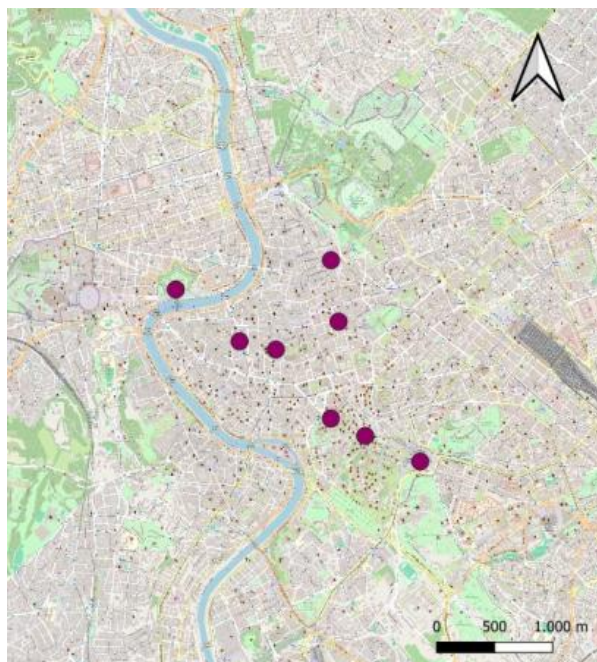


Figura 4. Principali siti turistici Comune di Roma.

Per quanto attiene la rete stradale e pedonale (nodi, archi, relativa lunghezza degli archi e categorizzazione), essa è stata estrapolata da OpenStreetMap attraverso il plug-in QuickOSM di QGIS. La rete importata include tutte le categorie di strade, comprese piste ciclabili, aree pedonali, sentieri e simili. Gli archi sono stati processati in modo da ottenere i nodi intersezione.

COD	COPERTURA
	1 SUPERFICI ABIOTICHE - NON VEGETATE
	1.1 Superfici artificiali ed edifici
1110	1,1,1 Superfici artificiali impermeabilizzate
1120	1,1,2 Superfici artificiali non impermeabili
1100	1,1,3 Altre superfici artificiali
	1.2 Superfici naturali
1210	1,2,1 Superfici consolidate
1220	1,2,2 Superfici non consolidate
	2 SUPERFICI VEGETATE
	2.1 Vegetazione legnosa
	2,1,1 Vegetazione arborea
2111	2,1,1,1 Latifoglie
2112	2,1,1,2 Conifere
2120	2,1,2 Vegetazione arbustiva
	2.2 Vegetazione erbacea
2211	2,2,1,1 Periodico
2212	2,2,1,2 Permanente
	3 CORPI IDRICI
3100	3.1 Corpi idrici permanenti
3200	3.2 Ghiacci e nevi perenni
4000	4 ZONE UMIDE

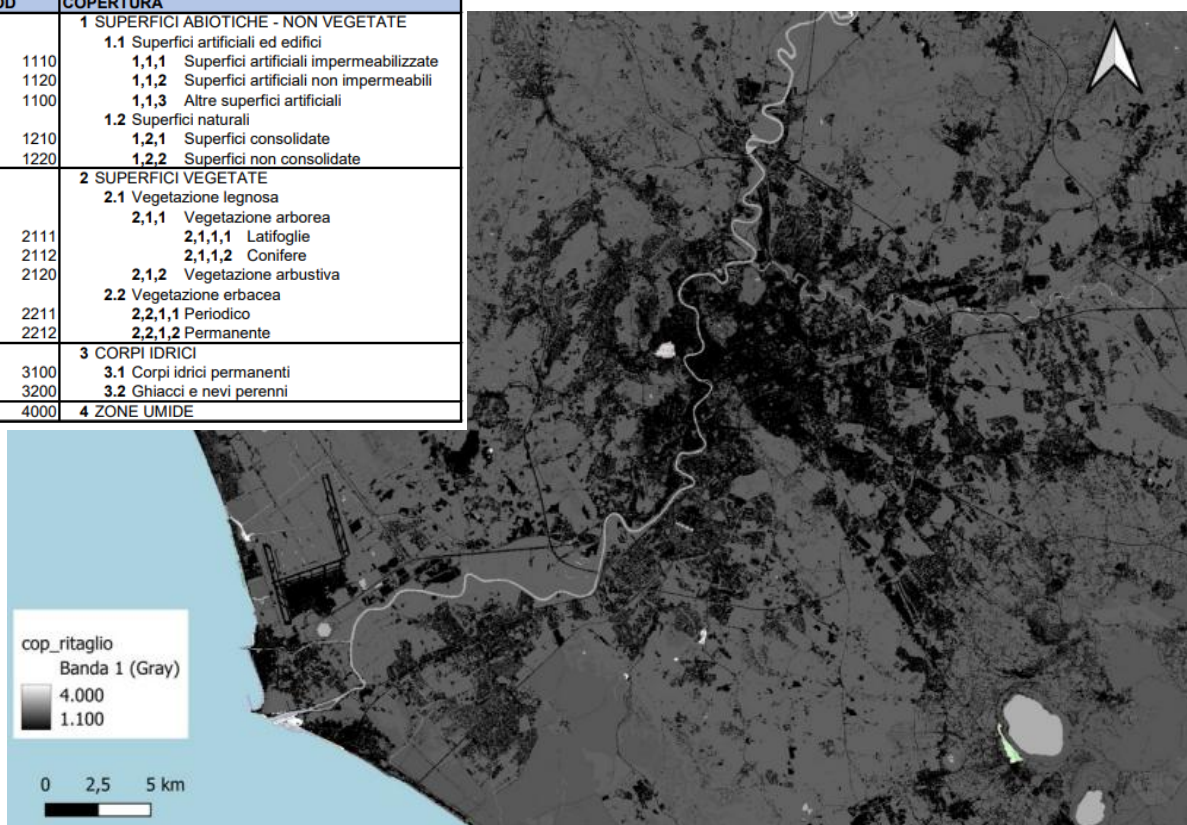


Figura 5. Carta Nazionale di Copertura del Suolo ISPRA 2022.

7.1.2 Dati di domanda e di utilizzo dei servizi di trasporto collettivo

I principali dati di domanda e di utilizzo del sistema di trasporto pubblico sono stati forniti da Roma Servizi per la Mobilità. Essi consistono in:

- Matrice di domanda del trasporto pubblico ora di punta della mattina, giorno feriale medio: la matrice origine-destinazione fornita consta di circa 238'750 spostamenti, di cui 177'417 intra Comune di Roma, 45'565 di scambio tra Comune di Roma e comuni dell'area metropolitana (di cui 42'720 dai comuni della provincia a Roma; 2'845 da Roma al resto della città metropolitana), 10'415 di scambio tra Roma e i centroidi esterni alla provincia, 5'362 di scambio tra comuni appartenenti alla città metropolitana (Comune di Roma escluso). La matrice ha dimensioni 1339 x 1339 (8 zone esterne alla Provincia);
- Dati dei passeggeri in ingresso [pax/h] rilevati ai tornelli durante i periodi di ottobre-novembre 2022 e febbraio-marzo 2023. Questi dati consentono di determinare la distribuzione temporale degli spostamenti; in particolare sono stati aggregati per singola ora e giorno tipo e ne è stato calcolato l'andamento relativo rispetto all'ora di punta (quote di pax/h nelle diverse fasce orarie). Tali quote sono state a seguire utilizzate per ricostruire i profili di spostamento tramite trasporto collettivo.

7.1.3 Dati sull'offerta dei servizi di trasporto collettivo

Per il computo dei tempi di viaggio e relative componenti (tempo a piedi, attesa, tempo a bordo), della soluzione di viaggio scelta (*routing*) tra singola coppia origine-destinazione, nonché per altre informazioni quali numero di trasbordi, fermate, numero di linee per fermata, frequenza di linea, si utilizzano i *General Transit Feed Specification* (GTFS; Google Transit, 2024). I dati GTFS sono un formato geo-referenziato e standardizzato per la pubblicazione on line dei servizi da parte delle agenzie di trasporto pubblico locale. In particolare, il database (statico, i.e. servizio programmato) GTFS utilizzato si riferisce al servizio di trasporto collettivo della città di Roma nel 2020. La scelta di utilizzare i dati GTFS del 2020 piuttosto che dati più recenti deriva dal fatto che i primi contengono informazioni anche sulle ferrovie urbane e le ferrovie ex concesse (Roma-Lido; Roma-Civita Castellana-Viterbo; Roma-Giardinetti). I dati delle linee su gomma extraurbane Cotral non sono disponibili né per i GTFS 2020, né per GTFS più recenti, ma si sottolinea come le relazioni di interesse siano prevalentemente urbane e non necessitano della componente di servizio extra-urbano.

7.2 Ricostruzione dei profili di spostamento sulla mobilità collettiva a partire da dati monitorati

La metodologia di ricostruzione dei profili di spostamento viene sviluppata con il fine di derivare le matrici di trasporto pubblico per singola ora di un giorno feriale medio. Si ricorda che i dati a disposizione per tale ricostruzione sono la matrice di domanda dell'ora di punta mattutina di un giorno feriale medio e le validazioni in entrata ai tornelli (dati RSM). L'ora di punta mattutina può essere associata alle partenze tra le 7:00-8:00, come verificabile dagli stessi dati dei tornelli (Figura 6).

Per tale ricostruzione, vengono dapprima identificate delle fasce orarie all'interno degli orari in cui il servizio di trasporto collettivo risulta attivo (i.e. dalle 5:00 alle 23:00), come di seguito riportate:

- 5-9 escluse (chiamata in seguito "am"): fascia di punta mattutina, caratterizzata da una prevalenza di viaggi di andata per spostamenti di natura sistematica (casa-studio, casa-lavoro);
- 9-13 escluse (chiamata in seguito "lm"): fascia di morbida mattutina;
- 13-16 escluse (chiamata in seguito "mh"): fascia di morbida pomeridiana, caratterizzata da una prevalenza di viaggio di rientro. In particolare si deve ricordare come in tale fascia sia prevalente il rientro dalle scuole e come molti utilizzatori del servizio di trasporto collettivo possano essere proprio studenti, soprattutto a partire dalle 13:00;
- 16-20 escluse (chiamata in seguito "pm"): fascia di punta pomeridiana, caratterizzata da una prevalenza di viaggi di rientro per spostamenti di natura sistematica;
- 20-23 incluse (chiamata in seguito "eh"): fascia di morbida serale.

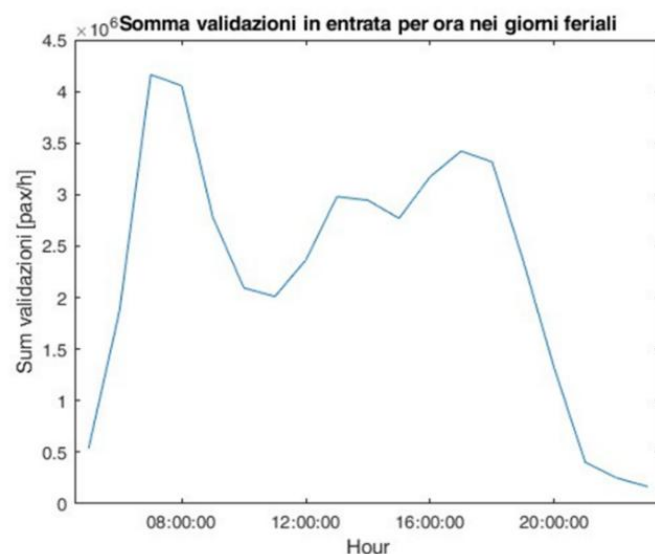


Figura 6. Andamento orario delle somme delle validazioni nei giorni feriali

Analizzando gli andamenti di ogni singola stazione dai dati dei tornelli e l'uso del territorio nel relativo bacino è possibile identificare la funzione della stazione stessa per gli spostamenti serviti. Ad esempio, nei giorni feriali si notano picchi mattutini in entrata in stazioni che servono zone per lo più residenziali (si veda il caso di Pietralata, Figura 7-a) o picchi pomeridiani in zone dal carattere commerciale (si veda il caso di Spagna, Figura 7-b). Attraverso l'identificazione del "ruolo" delle stazioni, si possono considerare gli andamenti dei tornelli su una o più specifiche stazioni come dei riferimenti per la fase di "andata/ritorno" verso le/dalle destinazioni all'interno della giornata.

La Figura 8 riporta l'andamento risultante delle matrici costruite nelle diverse ore del giorno, nonché il totale degli spostamenti di ogni fascia oraria definita ai fini della ricostruzione.

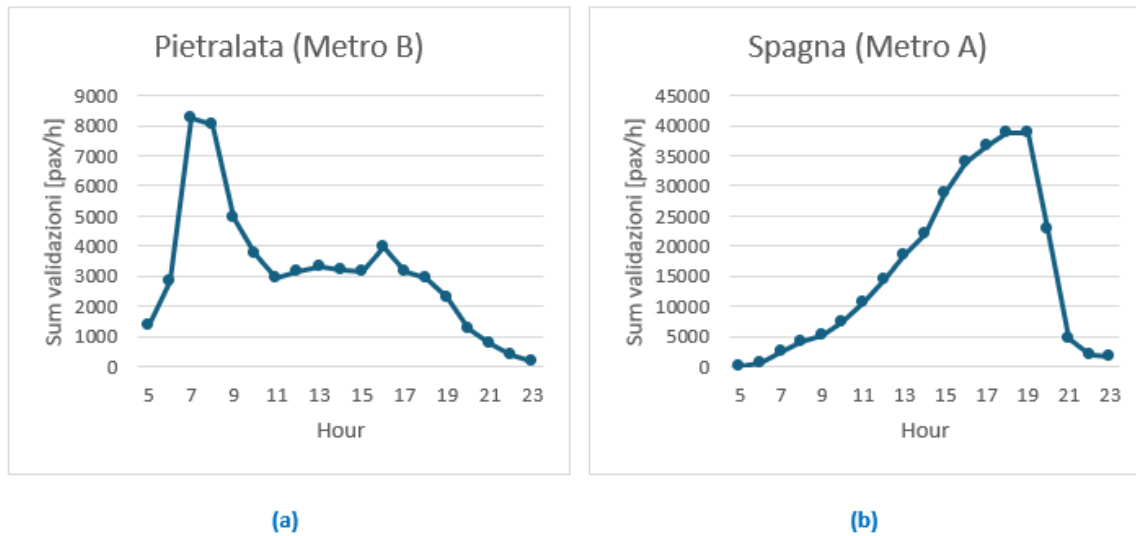


Figura 7. Andamento orario delle somme delle validazioni nei giorni feriali nelle stazioni di Pietralata (a) e Spagna (b).

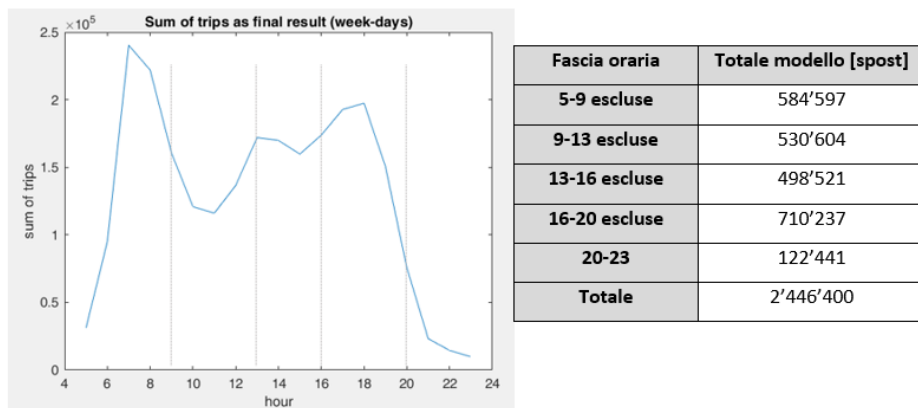


Figura 8. Profilo risultante matrici orarie per giorno feriale medio.

Si sottolinea che i valori di generazione e attrazione per ogni zona (nell'intero giorno feriale) sono stati confrontati in modo da evidenziare possibili squilibri tra spostamenti di andata e spostamenti di ritorno. Si è quindi formulata una procedura di bilanciamento di generazioni e attrazioni a livello zonale (Figura 9).

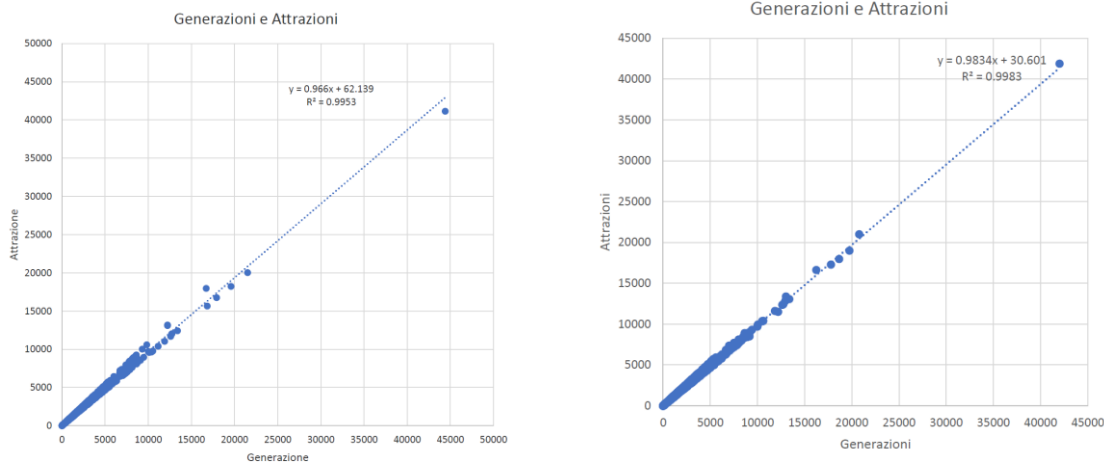


Figura 9. Confronto tra Generazioni e Attrazioni complessive delle singole zone nella giornata prima (sinistra) e dopo (destra) il bilanciamento.

7.3 Metodologia per l'identificazione di "Special Attractors"

L'individuazione di destinazioni *Special Attractors* permette di concentrare il computo degli indicatori per la valutazione del servizio di trasporto pubblico verso destinazioni di effettivo interesse per il servizio stesso. A tal fine, sono state identificate delle macro-categorie di *Special Attractors* che coprono le principali tipologie di attività ad alta attrazione:

- uffici;
- centri commerciali;
- grandi nodi di trasporto;
- poli ospedalieri;
- siti turistici;
- università;
- scuole secondarie di secondo grado (istituti superiori).

Per ciascuna di queste categorie sono stati definiti criteri di selezione utilizzando il software QGIS ed i dati sul land-use e sul sistema delle attività.

Successivamente, in presenza di stazioni ferroviarie e metropolitane negli *Special Attractors*, sono state "aggregate" più zone *Special Attractors* sulla base di un buffer di raggiungibilità pedonale (chiamato anche *Ideal Area*). Le zone *Special Attractors*, contenute completamente o parzialmente in questo buffer, vengono accorpate alla zona *Special Attractors* in cui è contenuto il centro del buffer (Figura 10).



Figura 10. Esempio accorpamento di zone *Special Attractors* completamente incluse nel buffer.

Si arriva così alla definizione di 92 zone *Special Attractors*, distribuite come riportato in Figura 11 rispetto alle zone PGTU (Piano Generale del Traffico Urbano).

La bontà della selezione degli *Special Attractors* è stata condotta attraverso un raffronto con i dati Floating Car Data (campione della mobilità privata) forniti da Roma Servizi per la Mobilità (20'833 veicoli circolanti nel Comune di Roma durante i mesi di Ottobre e Novembre 2022). Da questi, considerando i soli giorni feriali, sono stati computati gli spostamenti attratti in ogni zona del Comune di Roma tra le 7:00 e le 10:00.

La Figura 12 mostra come le prime 10 zone con maggiore attrattività in termini di trasporto privato siano tutte zone *Special Attractors*. La Figura 13 mostra invece come nella classe che contempla il 10% della domanda attratta FCD, 23 zone su 36 siano *Special Attractors*. Anche con questa tipologia di analisi si nota una concentrazione di zone *Special Attractors* nelle classi che rispecchiano i quantitativi maggiori di domanda attratta.

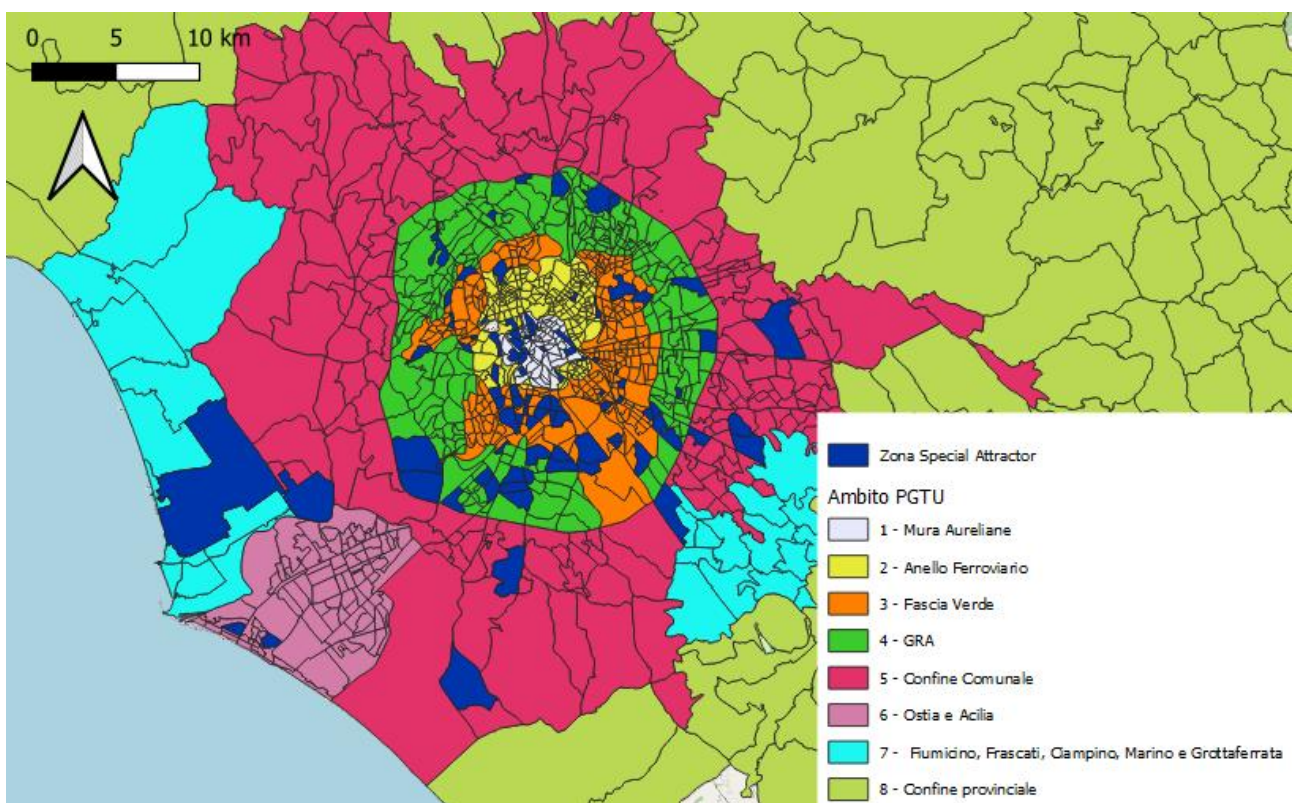


Figura 11. Insieme finale delle zone *Special Attractors* e loro localizzazione rispetto all'ambito PGTU

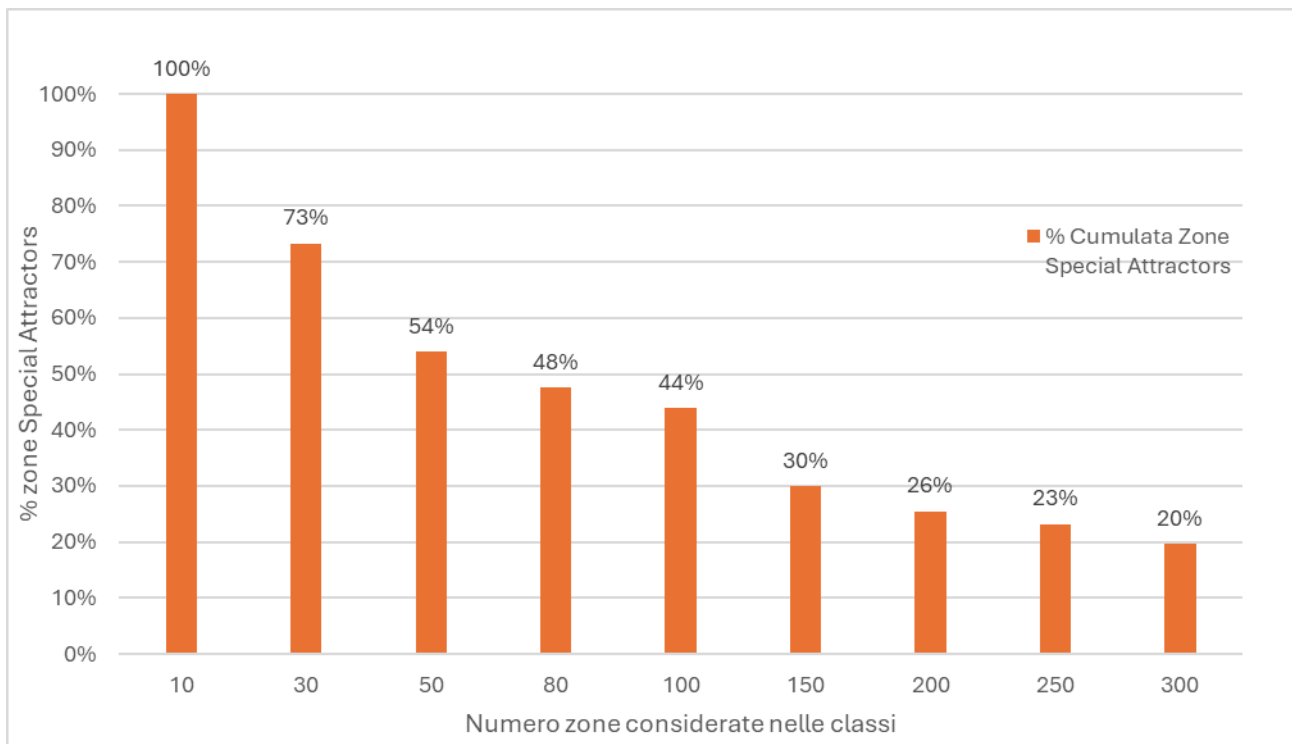


Figura 12. Validazione zone Special Attractors in base a numerosità di zone.

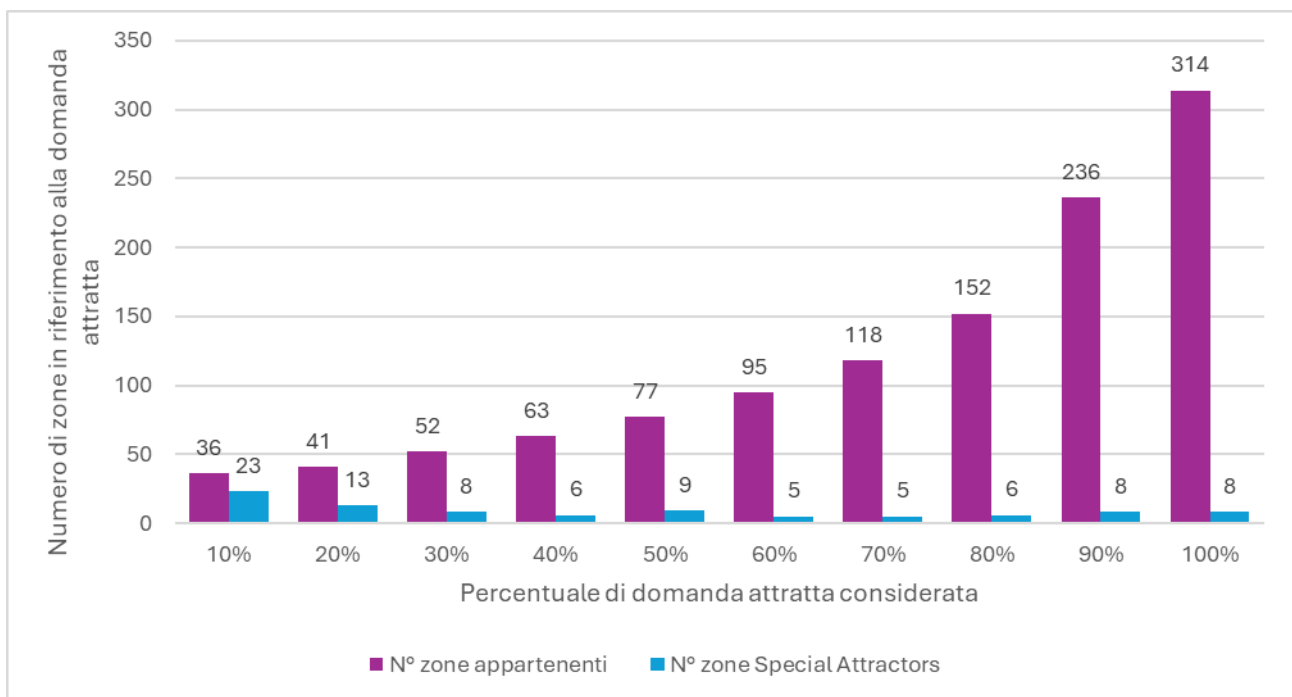


Figura 13. Validazione zone Special Attractors in base a domanda attratta.

7.4 Valutazione dello *script* di *routing* Connection Scan Algorithm

Per estrarre le prestazioni del sistema di trasporto pubblico per ogni connessione origine-destinazione è stato adoperato lo *script* di *routing* fornito da ENEA e basato sull'algoritmo di Connection Scan Algorithm (CSA; Dibbelt et al., 2018).

Gli input attesi dal CSA per procedere al calcolo delle singole soluzioni di viaggio sono:

- Input zionali: centroidi relativi alla zonizzazione dell'area di studio, dove il centroide è un nodo fittizio in cui hanno origine/destinazione tutti gli spostamenti in partenza/arrivo da/verso la specifica zona;
- Input temporali: istante di partenza e giorno del viaggio;
- Input dell'offerta: dati GTFS;
- Input relativi alla fase di accesso a piedi, i.e. distanza massima percorribile a piedi, velocità pedonale, peso del tempo a piedi;
- Ulteriori input: peso del trasbordo.

Tabella 1. Statistiche di tempi e distanze derivanti da CSA sul caso studio romano, orario di partenza 7:00 am, giorno feriale medio.

	minuti	minuti	minuti	#	minuti	km	Km
	Tempo di percorrenza complessivo	Tempo a bordo	Tempo a piedi	Numero di trasbordi	Tempo di attesa	Distanza complessiva percorsa	Distanza percorsa a piedi
Min	9.0	0.0	3.0	0.0	0.0	6.9	0.2
Media	58.4	29.0	17.6	1.6	11.8	12.0	1.1
Max	149.0	86.0	51.0	6.0	73.0	58.7	3.1
dev.std	24.5	16.4	7.2	1.0	9.1	7.4	0.4

Per adeguare i parametri del CSA al caso di studio il settaggio finale ha visto porre a 500 m la distanza limite pedonale, il peso del tempo a piedi a 2, la velocità pedonale a 1 m/s e infine il peso dei trasbordi al valore di 10. Tale settaggio ha considerato i centroidi posizionati in maniera baricentrica rispetto alla zona di afferenza. Per quelle relazioni per le quali il CSA non è stato in grado di trovare una soluzione a causa dell'assenza di fermate del sistema di trasporto pubblico nell'intorno dei 500 metri dal centroide, è stato individuato un nuovo posizionamento del centroide in funzione di input zionali relativi al suolo edificato/impermeabilizzato (da dati ISPRA) e input del servizio di trasporto in termini di posizionamento delle fermate (da dati GTFS), Figura 14.



Figura 14. Posizionamento del centroide di zona baricentrico e suo spostamento in funzione del land-use e delle fermate del trasporto pubblico.

7.5 Definizione di un sistema di indicatori a supporto della valutazione del sistema di trasporto pubblico

Di seguito si propone un sistema di indicatori zionali a supporto della valutazione del sistema di trasporto pubblico di un'area urbana. Le peculiarità di tale sistema risiedono nel fatto che:

- le destinazioni derivano dalle procedure di identificazione degli *Special Attractor*, dunque si rivolgono ad un sottoinsieme di zone realmente attrattive (pur non analizzando direttamente il dato di domanda);
- l'analisi sia singola che combinata di tali indicatori permette di valutare possibili criticità dell'attuale sistema di trasporto pubblico e definire le modalità con cui intervenire.

I gruppi di indicatori che sono stati costituiti e computati sono i seguenti:

1. Indicatori di **Pedonalità**;
2. Indicatori sul **Servizio offerto**;
3. Indicatori di **Prestazione del servizio**;
4. Indicatori di **Connettività**;
5. Indicatori di **Efficienza energetica**.

Tabella 2. Indicatori di pedonalità

Indicatori di Pedonalità			
Denominazione	Unità di misura	Definizione	Zona oggetto di calcolo
Densità nodi	[nodi/km ²]	Numero di nodi stradali interni alla zona per km ²	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine dello spostamento
Densità archi	[archi/km ²]	Numero di archi stradali interni alla zona per km ²	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine dello spostamento
Numero archi filtrati su Numero archi	-	Numero di archi stradali filtrati interni alla zona diviso il Numero di archi stradali interni alla zona	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine dello spostamento
Lunghezza archi filtrati su Lunghezza archi	-	Lunghezza complessiva degli archi stradali filtrati diviso la Lunghezza complessiva degli archi stradali interni alla zona	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine dello spostamento

Tabella 3. Indicatori sul Servizio offerto

Indicatori sul Servizio offerto			
Denominazione	Unità di misura	Definizione	Zona oggetto di calcolo
Densità fermate	[n°/km ²]	Numero complessivo di fermate nella zona su area	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine
Numero fermate ferro	[n°]	Numero complessivo di fermate metro e ferro nella zona	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine
Numero corse	[n°/ora di punta]	Numero di corse relative ai servizi di trasporto pubblico offerti nell'ora di punta mattutina	<i>Special Attractor</i> , Zona di origine
Numero connessioni dirette attive	[n°]	Numero di linee dirette da ogni zona di origine verso tutti gli <i>Special Attractor</i>	Zona di origine dello spostamento
Numero di <i>Special Attractor</i> raggiungibili	[n°]	Numero di <i>Special Attractor</i> raggiungibili direttamente dalla zona di origine	Zona di origine dello spostamento

Tabella 4. Indicatori di Prestazione del Servizio

Indicatori di Prestazione del Servizio			
Denominazione	Unità di misura	Definizione	Zona oggetto di calcolo
Tempo medio di viaggio	[min]	Tempo medio di viaggio per spostarsi da una zona di origine verso tutti gli Special Attractor tramite trasporto collettivo	Per ogni origine
Velocità media	[km/h]	La media delle velocità di viaggio tramite trasporto collettivo verso tutti gli Special Attractor	Per ogni origine
Numero medio di trasbordi	[n°]	La media dei trasbordi verso tutti gli Special Attractor	Per ogni origine
Peso medio del tempo a piedi	-	Rapporto tra il tempo a piedi ed il tempo totale di viaggio verso tutti gli Special Attractor	Per ogni origine
Peso medio del tempo di attesa	-	Rapporto tra il tempo di attesa ed il tempo totale di viaggio verso tutti gli Special Attractor	Per ogni origine
Rapporto medio tra i tempi di viaggio su modalità alternative	-	Tempo totale di viaggio/ Tempo di viaggio tramite autovettura (da dato FCD) verso tutti gli Special Attractor	Per ogni origine

Tabella 5. Indicatori di Connettività

Indicatori di Connettività			
Denominazione	Unità di misura	Definizione	Zona oggetto di calcolo
Isocrona	[n°]	Zone <i>Special Attractor</i> raggiungibili da ogni zona di origine in tempi di viaggio entro i 15, 30, 60, 90 min o >90 minuti	Per ogni origine

Tabella 6. Indicatori di Efficienza Energetica

Indicatori di Efficienza Energetica			
Denominazione	Unità di misura	Definizione	Zona oggetto di calcolo
Eccesso medio di estensione	[km]	Differenza tra la distanza totale per spostarsi da una zona di origine ad una zona di destinazione tramite trasporto collettivo e la distanza euclidea, mediata verso tutti gli <i>Special Attractor</i>	Per ogni origine
Rapporto medio tra distanze	-	Rapporto tra la distanza totale per spostarsi da una zona di origine ad una zona di destinazione tramite trasporto collettivo e la distanza euclidea, mediata verso tutti gli <i>Special Attractor</i>	Per ogni origine
Emissioni	[g XX]	g CO ₂ eq, g PM e g NO _x sviluppati dal singolo collegamento origine-destinazione, mediati verso tutti gli <i>Special Attractor</i>	Per ogni origine

8 Eventi di disseminazione e pubblicazioni scientifiche

Alla data di consegna del presente report, è stato inviato l'abstract dal titolo "Identifying Relevant Zones to Assess Effectiveness of Public Transport Services" per la partecipazione alla conferenza: XXVII International Conference Living and Walking in Cities 2025, che si terrà l'11 e 12 Settembre 2025 presso l'Università di Brescia (<https://lwc.unibs.it/>).

Il contributo si focalizza su una delle attività presentate nel report, ovvero la metodologia per l'identificazione delle zone *Special Attractors*. Infatti si ritiene che i numerosi contributi portati avanti nelle diverse attività di ricerca descritte nel presente report possano essere oggetto di più presentazioni in differenti sedi congressuali. La partecipazione a Living and Walking in Cities 2025 potrà permettere la disseminazione dell'attività specifica in sede di conferenza internazionale e potrà permettere la pubblicazione del successivo contributo anche su Special Issues di rivista. Gli Special Issues previsti per tale conferenza sono in particolare sulle riviste Infrastructures (EISSN 2412-3811), TeMA (ISSN 1970-9870) e European Transport/Trasporti Europei (ISSN 1825-3997).

Si ritiene di poter inviare un successivo contributo da focalizzare sulla definizione degli indicatori e relativa analisi per il contesto urbano romano alle seguenti conferenze:

- Euro Working Group on Transportation 27th Annual Conference, Edinburgh Napier University (date della conferenza: 1-3 Settembre 2025);
- TRB Annual Meeting 2026, Washington, DC (Gennaio 2026).

9 Riferimenti bibliografici

1. Google Transit, GTFS Static Overview, ultimo accesso 25/10/2024, <https://developers.google.com/transit/gtfs>
2. Boeing, G. OSMnx Documentation, ultimo accesso 18/11/2024, <https://osmnx.readthedocs.io/en/stable/>
3. Grandi Stazioni S.p.A., Grandi Stazioni Rail, ultimo accesso 18/11/2024, <https://www.grandistazioni.it/>
4. Cotral S.p.A, Cotral Open Data, ultimo accesso 18/11/2024, <https://www.cotralspa.it/open-data>
5. Regione Lazio, Pronto Soccorso nel Lazio, ultimo accesso 18/11/2024, <https://www.salutelazio.it/pronto-soccorso-nel-lazio>
6. Ministero dell'Università e della Ricerca, Metadati - Dataset USTAT, ultimo accesso 18/11/2024, <https://dati-ustat.mur.gov.it/dataset/metadati/resource/a332a119-6c4b-44f5-80eb-3aca45a9e8e8>
7. Provincia di Roma, Istituti superiori, ultimo accesso 18/11/2024, [http://www.datiopen.it/it/opendata/Provincia di Roma Istituti scolastici](http://www.datiopen.it/it/opendata/Provincia_di_Roma_Istituti_scolastici)
8. Roma Capitale, Turismo Roma, ultimo accesso 30/10/2024, <https://www.turismoroma.it/>
9. ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Carta Nazionale della Copertura del Suolo, ultimo accesso 18/11/2024, <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/suolo/copertura-del-suolo>
10. European Space Agency, ESA,2021. WorldCover Product User Manual Version 2.0., ultimo accesso 18/11/2024, https://worldcover2021.esa.int/data/docs/WorldCover_PUM_V2.0.pdf
11. Roma Mobilità. Piano Generale del Traffico Urbano (PGTU), ultimo accesso 18/11/2024, <https://romamobilita.it/it/progetti/piano-generale-traffico-urbano-pgtu>
12. Roma Servizi per la Mobilità, Rapporto Mobilità Roma 2023, ultimo accesso 25/10/2024, https://romamobilita.it/sites/default/files/RAM2023_090524_Versione%20Finale%20Compressa.pdf
13. Dibbelt, J., Pajor, T., Strasser, B., Wagner, D., "Connection Scan Algorithm", Journal of Experimental Algorithmics, 2018, Vol. 23, doi: 10.1145/3274661.
14. Gori, S., Nigro, M., Petrelli, M., "Walkability Indicators for Pedestrian-Friendly Design", Transportation Research Record, 2014, No. 2464, doi: 10.3141/2464-05.
15. Dill, J., "Measuring Network Connectivity for Bicycling and Walking", 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004.
16. Ufficio Statistico Roma Capitale, Il Trasporto Pubblico Locale a Roma 2019, ultimo accesso 18/11/2024, https://www.comune.roma.it/web-resources/cms/documents/TPL_Roma_2019_rev.pdf
17. COPERT, ultimo accesso 28/11/2024, <https://copert.emisia.com/wp-content/uploads/2024/07/1.A.3.b.i-iv-Road-transport-2024.pdf>